

## 일체형 주상용 몰드 변압기의 덕트에 따른 열해석 특성 연구

### The Thermal Analysis of Pole Mount Mold Transformer with One-body Molding by Duct Condition

조한구<sup>1,a</sup>, 이운용<sup>1</sup>, 박영두<sup>2</sup>  
(Han-Goo Cho<sup>1,a</sup>, Un-Yong Lee<sup>1</sup>, and Young-Doo Park<sup>2</sup>)

#### Abstract

The mold transformers have been widely used in underground substations in large building and have some advantages in comparison to oil-transformer, that is low fire risk, excellent environmental compatibility, compact size and high reliability. In addition, the application of mold transformer for outdoor is possible due to development of epoxy resin. The mold transformer generally has cooling duct between low voltage coil and high voltage coil. A mold transformer made by one body molding method has been developed for small size and low loss, but it needs some cooling method because heat radiation between each winding is difficult.

The life of transformer is significantly dependent on the thermal behavior in windings. Many transformer designers have calculated temperature distribution and hot spot point by finite element method(FEM) to analyze winding temperature rise.

In this paper, The thermal analysis of pole mount mold transformer with one body molding by duct condition is investigated and the test result of temperature rise is compared with simulation data.

**Key Words** : Pole mount, Mold transformer, One body molding, Air duct, Thermal analysis, Finite element method

#### 1. 서 론

유입 변압기는 현재까지 주류를 이루고 있지만 수배전설비의 고신뢰성 측면과 오일의 환경오염, 누유 등이 문제로 되고 있으며, 폭발사고에 따른 화재위험을 가지고 있다. 따라서 화재에 대한 안전성 및 유지보수의 경제성과 편리함에 대한 요구가 증가되고 있다.

최근 변압기 관련 기술동향을 보면, 이러한 유입

변압기의 단점을 보완하기 위해 난연성 오일 등을 절연유로 채택하여 화재의 위험을 감소시키는 난연성 유입 변압기에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 대용량 변압기로 갈수록 필요성이 요구되는 소형·경량화를 위해 우수한 내열재료를 채택한 변압기를 비롯하여 무부하손이 기존의 철심재료보다 월등히 적은 아몰피스 철심 변압기, 권선을 에폭시로 몰딩 절연하는 몰드 변압기도 연구되고 있다. 그밖에도 초고압 가스절연 변압기, 초전도 변압기 등도 연구되고 있다[1].

몰드 변압기는 난연성을 구비한 에폭시 몰딩부와 공기층의 복합절연으로 구성되어 있다. 몰드 변압기가 난연성의 변압기로서 주종을 이루고 있는 것은 가격에 비해 에너지 절감, 안전성, 환경 측면 및 간편한 유지보수 등 여러 가지 이점이 있기 때

1. 한국전기연구원 재료응용연구단

(경남 창원시 성주동 28-1)

2. 산일전기(주)

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr

접수일자 : 2003. 10. 1

1차 심사 : 2003. 11. 11

심사완료 : 2003. 12. 16

문이다.

몰드 변압기는 절연성능이 우수한 에폭시 수지를 효과적으로 활용한 합리적 절연설계에 따라 유입 변압기 및 건식 변압기와 비교하여 소형·경량화 할 수 있다[2]. 특히, 고압권선과 저압권선이 함께 몰딩되는 일체형 몰드 변압기는 기존형보다 소형화가 가능하지만, 방열면적의 감소로 인한 열적 문제를 해결하는 것이 중요하다.

최근 변압기 수치해석 분야는 전계, 자계, 전위 진동, 온도분포, 열응력, 열유체 해석 등에 대해서 연구되고 있다[3-5]. 변압기의 수명은 권선의 열적 특성에 의해 크게 좌우되며, 이러한 권선온도 상승을 분석하기 위해 많은 변압기 설계자들이 수치해석을 통하여 권선의 온도분포, hot spot 온도특성, 열응력 분포 등을 분석한다. 이러한 수치해석을 통해 변압기의 설계시간, 비용 등을 저감할 수 있다[6].

본 논문에서는 주상용 유입변압기와는 전혀 다른 몰드 변압기로, 기존 고압 및 저압권선이 분리된 몰드 변압기와는 달리 1, 2차 권선을 일체형으로 주형화한 50kVA 주상용 몰드 변압기를 설계하고 덕트 구조의 냉각 특성을 유한요소법 프로그램을 통해 검토하였으며, 온도상승시험을 통해 해석결과와 비교 분석 검토하였다.

## 2. 몰드변압기의 열해석

### 2.1 일체형 몰드 변압기

일반적인 지상 설치형 몰드 변압기의 권선구조는 그림 1(a)와 같이, 고압권선과 저압권선이 분리되어 있으며, 각 권선 사이에 덕트가 삽입된다. 그러나, 일체형 몰드 변압기의 경우는 고압권선과 저압권선이 함께 몰딩되어 그림 1(b)와 같은 구조를 갖는다[7].

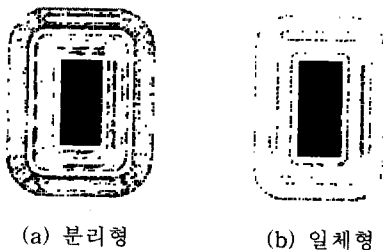


그림 1. 몰드 변압기의 덕트구조.  
Fig. 1. Duct structure of mold transformer.

### 2.2 일체형 몰드 변압기의 덕트구조에 따른 열해석

일체형 몰드 변압기는 외함의 통풍구조를 통해 자연대류에 따른 공기냉각 방식으로 이루어진다. 몰드 변압기의 축대칭 모델에서 열전도 방정식은 식 (1)과 같으며, 외부 경계조건은 식(2), (3)과 같다[8].

$$k_r \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -Q \quad (1)$$

$$q = h_{ic}(T - T_c(z)) \text{ 내부벽} \quad (2)$$

$$q = h_{ec}(T - T_a) \text{ 외부표면} \quad (3)$$

여기서, T : 온도 (°C)

T<sub>a</sub> : 외부 분위기 온도 (°C)

T<sub>c</sub>(z) : 공기덕트의 온도 (°C)

q : 열속 (W/m<sup>2</sup>)

k<sub>r</sub>, k<sub>z</sub> : r방향과 z방향으로의 열전도율 (W/m °C)

Q : 손실 (W/m<sup>3</sup>)

h<sub>ic</sub>, h<sub>ec</sub> : 내부 벽과 외부 표면에서의 대류열전달 계수(W/m<sup>2</sup> °C)

대부분의 경우, 권선이나 철심에서 발생하는 열을 권선간이나 철심 사이에 있는 공기덕트 내에서의 자연대류 열전달에 따라서 냉각된다. 일반적으로 평균 온도상승 θ는 식 (4)로 계산되지만, 제정수는 많은 실험 및 실측 데이터에 따라 설정된다. 여기서 n, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S : 방열면적(m<sup>2</sup>)이다.

$$\theta = K_1 \cdot \left( \frac{K_2}{F} \cdot \frac{W}{S} \right)^n \quad (4)$$

1층 덕트 및 2-3층 덕트구조의 설계모델에 대한 온도분포를 예측하기 위해 유한요소법(FEM) 상용 프로그램인 MSC/Nastran for Windows 프로그램을 사용하였다. 설계 변압기의 구성재료인 에폭시, 저압 및 고압코일, 유리섬유 등에 대한 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하였으며, 표 1에 각 재료들의 열적 파라미터를 나타내었다. 부하조건으로는 저압 및 고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 외함 내부의 자연대류 조건을 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 자연대류 설정 시의 온도조건은 기존에 외함 내부에 몰드변압기의 대류특성을 실험을 통해

확인하여 48℃로 설정하였다[9,10]. 설계 변압기의 각 권선의 발열량 및 대류조건을 표 2에, 변압기 열해석을 위한 MSC/ Nastran의 해석과정을 그림 2에 나타낸다.

표 1. 각 재료의 열적 파라미터.

Table 1. Thermal parameters of each material

재료	열전도율 (W/m·℃)	열팽창계수 (10 <sup>-6</sup> /℃)	비열 (kcal/kg·℃)
에폭시수지	0.25	65	-
동선	384	17	0.092
유리섬유	10.4	7	0.19

표 2. 각 부분별 발열량 및 대류조건.

Table 2. Heat generation and convection condition of each part.

부분	발열량 [W/mm <sup>3</sup> ]	대류전달계수 [W/mm <sup>2</sup> ·℃]
저압 코일	0.0000293	-
고압 코일	0.0000303	-
철심	0.000006	0.000005
변압기 표면	-	0.000005
덕트 표면	-	0.000002



그림 2. 해석 순서.

Fig. 2. Analysis process.

### 2.3 열해석 결과 및 고찰

육내용 에폭시수지를 주절연으로 하고 통풍구조를 갖는 외함을 채택하여 일체형 덕트구조를 갖는 주상변압기로 적용하였으며, 특히, 외함 내부에 설치됨에 따라 일체형이 갖는 방열면적의 감소를 위해 2~3층의 덕트방식으로 설계하여 검토하였다.

2~3층 덕트방식은 권선부분의 냉각성능을 보다 향상시키기 위해 덕트수를 증가시킨 것이다. 변압기의 권선구조는 일반적으로 안쪽에 저압권선이 배치되며, 권선 바깥쪽에 고압권선이 배치되는데 철심이 감기는 부분은 저압권선 사이에 덕트 1층을 삽입하고(2층 덕트방식) 감기지 않는 쪽은 고압권선 사이에 1개의 덕트를, 저압권선 사이에도 1개의 덕트를 각각 추가하여 3층 덕트방식으로 설계하였다.

해석 대상은 권선의 덕트가 삽입된 부분을 A, B 부분, 덕트가 없는 부분을 C 부분으로 분류하여, 그림 3과 같이 덕트 1층 타입과 덕트 2-3층 타입에 대한 각 부분별로 모델링을 하였다. A 부분은 철심이 감기는 부분이며, B 부분은 철심이 감기지 않는 부분, C 부분은 덕트가 삽입되는 않는 부분을 나타낸다. 각 부분에 대한 열해석 결과를 표 3, 그림 4에 각각 나타내었다.

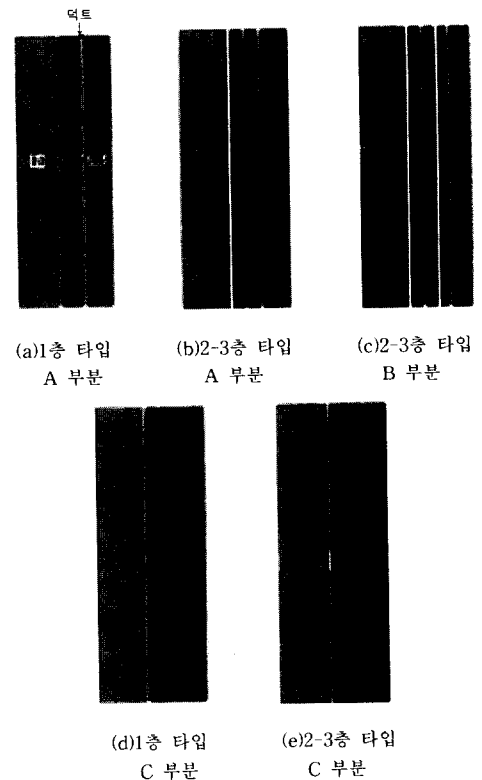


그림 3. 각 타입에 대한 모델링.

Fig. 3. Modeling of each type.

2-3층 타입의 A 부분과 1층 타입의 A 부분의 해석결과를 보면 저압권선에 추가한 덕트로 인해 저압권선의 온도가 106.4℃에서 89.41℃로 약 17℃ 정도가 낮아진 것을 알 수 있으며, 고압권선이 95.93℃에서 100.1℃로 변화되었다. 특히, 고압권선 사이에도 덕트를 추가한 2-3층 타입의 B 부분을 보면 고압권선의 온도가 89.72℃로 더 낮아졌다. 즉, 저압권선 쪽의 높은 온도가 덕트의 추가로 인하여 고압권선 쪽으로 hot spot 온도의 이동이 나타났으며, 고압권선 쪽도 덕트의 추가에 따라 약 10℃ 정도가 낮아지는 경향을 보였다.

표 3. 각 타입의 A, B 부분 열해석 결과.

Table 3. Results of thermal analysis on each model type.

해석 모델	Hot spot 온도(°C)	고압권선	저압권선
1층 타입 A 부분	106.4	95.93	106.4
2-3층 타입 A 부분	100.1	100.1	89.41
2-3층 타입 B 부분	89.72	89.72	83.91
1층 타입 C 부분	125	119.5	125
2-3층 타입 C 부분	127	123	127

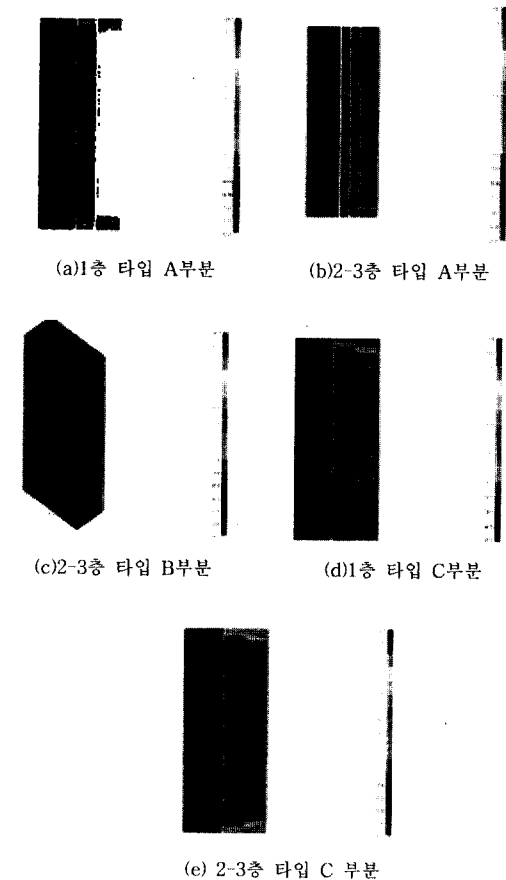


그림 4. 각 부분의 열해석 결과.  
Fig. 4. Results of thermal analysis in each 부분.

덕트가 없는 C 부분에 대한 해석결과를 보면 1층 타입의 경우는 125°C, 2-3층 타입의 경우는 127°C로 저압권선에서 hot spot 온도가 나타났으며, 고압권선의 온도도 각각 119, 123°C로 나타났

다. 하지만 이 부분의 높은 온도는 덕트 쪽으로 이동하여 낮아지며, 실제 온도상승시험에서도 이 부분의 온도감소가 중요할 것으로 사료된다. 또한 덕트 표면의 온도는 해석 결과, 각 권선의 중심온도와 약 1°C정도의 차이를 가지며 거의 권선온도와 비슷하였다.

열해석 결과를 바탕으로 2-3층 타입의 몰드 변압기를 제작하여 등가부하법으로 온도상승시험을 시행한 결과를 보면 고압권선은 86[deg], 저압권선은 70[deg]로 나타났다(F종 몰드 변압기 온도상승 한도는 100 [deg])10 온도상승시험시 주위온도가 21°C였으므로 결국 고압권선의 최종 포화온도는 107°C, 저압권선의 최종 포화온도는 91°C로 온도분포를 보였다. 앞에서의 열해석 결과와는 고압권선은 약 7°C, 저압권선은 약 2°C정도 차이가 났지만, 거의 유사한 분포를 보였다.

그림 5는 온도상승시험에서 동손시험 시에 온도가 포화되었을 때 변압기 외함의 대류특성을 검토하기 위하여 적외선 카메라(Thermo Tracer TH 5104)로 온도분포를 촬영하였다. 변압기 중심부가 위치하는 외함의 표면온도는 32.1°C로 나타났으며 외함 상부 쪽의 통풍구 쪽도 32.6°C로 나타났다. 외함 하부 쪽은 24.5°C로 낮았으며 결국 하부에서 상부 쪽으로의 열대류 흐름이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 변압기 중심부 외함의 온도와 외함 통풍구 쪽 온도와 거의 같은 것으로 볼 때 외함의 대류가 원활히 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

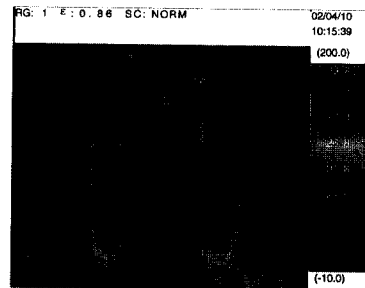


그림 5. 변압기 외함의 온도분포.  
Fig. 5. Thermal distribution of transformer tank.

### 3. 결론

본 연구에서는 주상 변압기로 몰드변압기를 적

용하기 위해 검토된 일체형 권선구조에서의 덱트 형태에 따른 설계 및 열해석을 통해 덱트 1층 타입과 2-3층 타입을 비교하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1층 타입의 온도분포 경향은 A 부분에서 저압 권선 중심온도가 106.4℃, 고압권선은 95.93℃로 나타났다. 덱트가 없는 C 부분에 대한 결과는 저압권선 및 고압권선의 중심온도가 125℃, 119.5℃로 나타났다.
- 2) 2-3층 타입의 경우, A 부분에서는 저압권선의 온도가 106.4℃에서 89.41℃로 낮아진 것을 알 수 있으며, 고압권선도 95.93℃에서 100.1℃로 변화되었다. B 부분에서는 고압권선의 온도가 89.72℃로 약 10℃ 정도가 더 낮아졌다.
- 3) 2-3층 타입 C 부분에서는 1층 타입과 마찬가지로 저압권선의 온도는 127℃, 고압권선의 온도는 123℃로 다소 높게 나타났다. 하지만 이 부분의 온도는 덱트쪽으로 이동하여 낮아짐을 알 수 있었다.
- 4) 2-3층 타입의 일체형 몰드 변압기를 제작하여 실제로 온도상승시험 결과, 저압권선의 최종포화온도는 91℃, 고압권선은 107℃로 해석 데이터와 거의 유사한 경향을 나타내었다.
- 5) 온도상승 포화시 변압기 외함의 대류특성을 검토한 결과, 변압기 외함의 대류가 원활히 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] 조한구, "옥외용 몰드 주상변압기의 적용기술", 한국전력공사 기술개발, 제46집, 2001.
- [2] 津野降司, "新型モールド變壓器", 電氣評論, 1996.
- [3] Takeshi Noda, Shunichi Takahira, "重電機器를 支配する熱流體 解析", Takaoka Review, Vol. 47, No. 3, p. 68, 2000.
- [4] Linden W. Pierce, "Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1994.
- [5] Toshiya Nakayama, Takeshi Noda, Tomoaki Banno, "Numerical Analysis Technology of Molded Equipment", Takaoka Review, Vol. 43, No. 4, 1998.

- [6] 조한구, 이운용, "몰드 절연물의 해석기술", 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, 2002.
- [7] 前田孝夫, "一體注型方式によるモールド變壓器", 日本電氣協同研究會, SA-91-70.
- [8] A. Fernandes-costa, Manuel Vaz-guedes, "Prevision of The Thermal Behavior of Dry-Type Cast Resin Transformers", Electric Machines and Power Systems, p. 261, 1992.
- [9] 조한구, 이운용, 한세원, 김석수 "주상용 몰드 변압기의 온도분포와 열응력 해석", 전기기전재료학회 논문지, 14권, 4호, 2001.
- [10] 조한구, 이운용, "50 kVA 주상용 몰드 변압기의 설계 및 특성평가", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, 2002.